

dr inż. Paweł Sulik¹⁾
ORCID: 0000-0001-8050-8194

Wymagania dotyczące odporności ogniowej tuneli

Tunnel fire resistance requirements

DOI: 10.15199/33.2020.07.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowe wymagania dotyczące odporności ogniowej tuneli, wynikające ze znowelizowanych w 2019 r. aktów prawnych. Dodatkowo zaprezentowano najczęściej stosowane rozwiązania techniczne zapewniające wymaganą klasę odporności ogniowej konstrukcji tuneli.

Słowa kluczowe: tunel; odporność ogniowa; zabezpieczenia ogniochronne.

Abstract. The paper presents new requirements in the field of fire resistance of tunnels. The new requirements were published in 2019 in the legal act of the minister of infrastructure. In addition, the most commonly used technical solutions providing the required fire resistance class for tunnel construction were discussed.

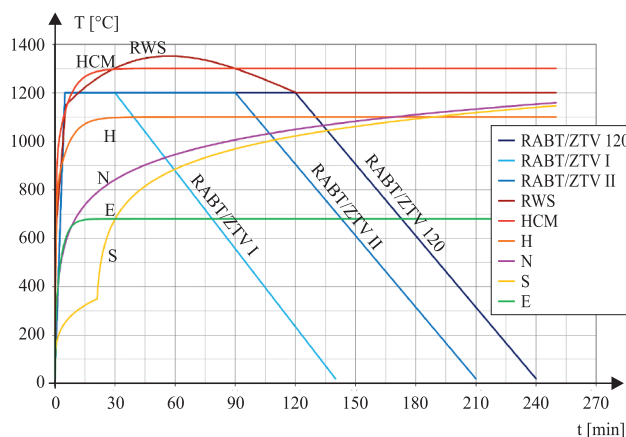
Keywords: tunnel; fire resistance; fire protection.

Konstrukcja nośna tuneli wykonana jest najczęściej z żelbetu. Zagadnienia budowy tuneli zostały szczegółowo opisane w literaturze [1, 5, 10]. Bez względu na zastosowaną technologię w efekcie końcowym otrzymujemy rodzaj rury, o przekroju kołowym, łukowym lub wielokątnym, w której możliwy jest transport np. szynowy, drogowy, pieszy. Z ogniowego punktu widzenia taki tunel przypomina „przewrócony” komin, w którym panują ekstremalne warunki w przypadku pożaru. O ile wstępna faza pożaru i propagacja gorących i toksycznych gazów pożarowych jest szczególnie niebezpieczna dla ludzi przebywających w tunelu, o tyle pożar rozwinięty i wysoka temperatura potrafią być niebezpieczne dla konstrukcji tuneli (tabela). W pierwszym wypadku decydującą rolę odgrywa prawidłowa wentylacja pożarowa, która jest w stanie zmniejszyć temperaturę i odprowadzić dym, umożliwiając ewakuację [16], natomiast w przypadku konstrukcji obudowy tunelu kluczową rolę odgrywają bierne zabezpieczenia ogniochronne [15].

Krzywe tunelowe

Istotną rolę z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego jest przypisanie właściwego scenariusza pożarowego, w tym krzywej opisującej temperaturę w czasie. W obowiązujących do sierpnia 2019 r. aktach prawnych w Polsce [11] mieliśmy przypisane nierzeczywiste krzywe, prawidłowe w przypadku pożaru w budynkach (N), ale nie tunelach (RWS, RABT). Istotą problemu była znacznie niższa temperatura (rysunek) w stosunku do realnie zmierzonej podczas badań ogniowych w tunelach. Takie rozwiązanie uważano za zwiększające ryzyko wystąpienia katastrofy obudowy tunelu na skutek pożaru.

Na świecie mamy kilka krzywych przypisanych pożarom w tunelach, przy czym najbardziej rozpowszechniona, np. w Holandii, USA, Włoszech, Austrii, jest krzywa RWS opracowana w Holandii przez laboratorium badawcze TNO w 1979 r. Zakłada ona pożar cysterny z paliwem o obciążeniu ogniowym 300 MW przez 120 min i osiągnięcie maksymalnej temperatury 1350°C. Inną grupą krzywych są obowiązujące w Niemczech, ale uwzględniane również w Chinach,



Porównanie krzywych pożarowych

Comparison of fire curves

krzywe RABT, które w pierwszych pięciu minutach pożaru osiągną 1200°C. Krzywe te powstały w wyniku programu naukowego Eureka Project. Dotychczas zrealizowano kilka dużych projektów badawczych, m.in. Eureka FireTun (1990 – 1992) czy UpTun, znany jako „Large Scale fire tests in Runehamar Tunnel in Norway” (2002 – 2006). Badania wykonane w tym drugim projekcie potwierdziły, że możliwe jest osiągnięcie temperatury 1365°C w odległości 10 m od źródła pożaru [7].

Zagrożenia pożarowe żelbetowych obudów tuneli

Żelbet, który jest materiałem niepalnym, jednak nie jest odporny na gwałtowny przyrost temperatury i wartości powyżej 1000°C, jakie występują podczas pożaru tuneli. Wówczas bowiem wskutek intensywnego odparowania wody z betonu następuje wzrost ciśnienia pary do znacznej wielkości, a w efekcie odpryskiwanie betonu (*spalling concrete*) [2, 9]. W zależności od przyrostu temperatury można określić rodzaj odpryskiwania betonu. Kryteria brane pod uwagę to powolny przyrost temperatury: 1°C/min oraz gwałtowny, który wynosi 250°C/min. Odpryskiwanie może mieć różne postacie: gwałtowne; stopniowe; narożne; wybuchowe oraz odpryskiwanie w trakcie chłodzenia. Stwarza ono zagrożenie nie tylko w postaci odłamków mogących wyrządzić szkody,

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej; Zakład Badań Ogniowych; p.sulik@itb.pl

Wybrane pożary tuneli [4]

Selected tunnels fires [4]

Rok	Długość tunelu [m]	Kraj	Pojazd, w którym zauważono pożar	Prawdopodobna przyczyna pożaru	Czas trwania pożaru [h]	Konsekwencje w ludziach	Zniszczone pojazdy	Odbudowa tunelu i instalacje
1979	2045	Japonia	4 sam. ciężarowe, 2 sam. osobowe	kolizja przód-tył pojazdów	159	7 ofiar śmiertelnych	127 ciężarówek, 46 samochodów osobowych	ogromne zniszczenia na długości 1100 m
1994	b.d.	Dania	maszyna TBM	wybuch maszyny TBM na skutek wycieku oleju	b.d.	b.d.	maszyna TBM	zniszczona betonowa obudowa tunelu
1994	3914	Afryka Południowa	autobus	zwarcie instalacji elektrycznej autobusu	1	48 ofiar	1 autobus	ogromne zniszczenia, zamknięty przez tydzień
1995	b.d.	Azerbejdżan, Baku	kolejka metra	zwarcie elektryczne	b.d.	289 ofiar śmiertelnych	2 wagony kompletnie spalone	brak widocznych uszkodzeń obudowy tuneli
1997	2100	Włochy	pociąg przewożący samochody	otwarte drzwi samochodu zaczęły instalację elektryczną	5		13 wagonów, 156 samochodów	odpryskiwanie betonu (spalling)
1999	6400	Austria	ciężarówka z farbą	zderzenie czołowe czterech samochodów i dwóch ciężarówek	15	b.d.	16 ciężarówek, 24 samochody osobowe	poważnie zniszczony
1999	1600	Francja – Włochy	ciężarówka przewożąca margarynę	wyciek oleju z silnika	> 53	39 ofiar śmiertelnych	23 ciężarówki, 10 samochodów osobowych, 1 motocykl, 2 samochody straży pożarnej	poważnie zniszczony, otwarty ponownie po 2 latach
2000	b.d.	Austria	kolejka podziemna	wyciek oleju na podgrzewacz	3	155 ofiar śmiertelnych	całkowite zniszczenie pociągu	b.d.
2001	16918	Szwajcaria	ciężarówka	zderzenie czołowe dwóch ciężarówek	>48	14 ofiar	19 ciężarówek, 6 samochodów osobowych	runięcie 250 m konstrukcji w tunelu
2003	b.d.	Korea Południowa, Daego	kolejka metra	przewożenie benzyny i niedopałki papierosów	3 h 45 min	198 ofiar, 146 rannych, w tym 20 strażaków	spalony skład metra	b.d.
2008	51000	Wielka Brytania-Francja (Eurotunnel)	HGV	b.d.	>16	14 ofiar	HGV, 800 m wagonów	poważne odpryskiwanie betonu (spalling)

ale przede wszystkim przez odsłonięcie stalowego zbrojenia, które dużo szybciej traci swoje właściwości nośne, co przekłada się oczywiście na nośność całej konstrukcji. W skrajnych przypadkach może nastąpić nawet zawalenie fragmentu tunelu, jak w przypadku pożaru tunelu pod Mont Blanc.

Zabezpieczenia ogniochronne żelbetowych obudów tuneli

Projektując żelbetową konstrukcję obudowy tunelu w Polsce, do sierpnia 2019 r. mieliśmy rozbieżności pomiędzy wymaganiami określonymi w przepisach [11] a stanem wiedzy technicznej. Sytuacja uległa diametralnej zmianie, kiedy znowelizowano wymagania [12], co znalazło swoje odzwierciedlenie w § 321.2, w którym w tabeli podano wartości temperatury w czasie zgodne z krzywą RWS, a nie jak dotychczas z krzywą standardową (oznaczenie R przy klasie odporności ogniowej jednoznacznie to definiowało). Przytoczona krzywa RWS dotyczy pewnej klasy tuneli drogowych i nie obejmuje np. tuneli pieszych czy rowerowych, gdzie zostawiono oddziaływanie pożaru standardowego jako kryterium, co ocenia się jako racjonalne i niepodnoszące nadmiernie kosztów inwestycji.

W przypadku projektowania zabezpieczenia ogniochronnego tuneli drogowych, w których odbywa się ruch samochodowy, należy rozważyć następujące kryteria: rodzaj krzywej ogniowej, wg której chcemy zabezpieczyć konstrukcję; jak długo dana konstrukcja ma wytrzymać w ogniu; rodzaj tunelu oraz typ betonu użyty do jego konstrukcji; zawartość wilgotności w betonie oraz rodzaj kruszywa użytego do mieszanki betonowej. Mają one fundamentalny wpływ na grubość oraz rodzaj wymaganego zabezpieczenia ogniochronnego konstrukcji i należy sobie zdawać sprawę, że nie każde zabez-

pieczenie ogniochronne zapewni oczekiwaną funkcję bezpieczeństwa [13].

Wśród najczęściej stosowanych zabezpieczeń ogniochronnych tuneli należy wymienić: zabezpieczenia płytami oraz natryskiem. Nie stosuje się np. izolacji powłokowych, które służą przede wszystkim do zabezpieczania konstrukcji stalowych [6]. Zabezpieczenia płytowe, to najczęściej okładziny na bazie spoiwa cementowego, gipsowego, cementowo-wapiennego itp., ze zbrojeniem w postaci włókien szklanych oraz z różnego rodzaju wypełniaczami, ewentualnie okładzinami z wełny mineralnej, przy czym te ostatnie powinny mieć gęstość większą od 100 kg/m³ (najpopularniejsze rozwiązanie ma gęstość 150 kg/m³). Należy pamiętać, że nie każde rozwiązanie dobrze sprawdzające się w pożarze standardowym da sobie radę z pożarem tunelowym RWS. Należy więc zwracać uwagę na rodzaj krzywej pożarowej, przy której badano płyty. W przypadku natrysków, najczęściej na bazie wermikulitu i cementu portlandzkiego, stosuje się dwa zakresy gęstości: 250 – 400 kg/m³ – natryski lekkie; 700 – 800 kg/m³ – ciężkie, przy czym te drugie są bardziej odpowiednie do ekstremalnych warunków, jakie panują w tunelach.

Podsumowanie

Aktualna wiedza techniczna z dziedziny bezpieczeństwa pożarowego wskazuje na konieczność specjalnego traktowania tuneli, ze względu na bardzo wysoką temperaturę pożarów. Dostosowało się do tego polskie prawo, nowelizując rozporządzenie z 2000 r. Niestety w ślad za wprowadzeniem rozporządzenia z 2019 r. nie idą żadne normy europejskie dotyczące badań odporności ogniowej tego typu obiektów czy normy na badania skuteczności ogniochronnej ich zabezpieczeń, których zastosowanie ograniczono tylko do pożarów no-

minalnych – standardowych. Powszechnie stosowaną metodą badań jest zatem opracowana przez laboratorium Efectis (dawniej TNO), procedura 2008-Efectis-R0695 [3], z własną krzywą nagrzewania RWS przytoczoną w polskich przepisach [12]. Metoda ta jest rozpowszechniona do tego stopnia, że jak wspominałem, wiele państw wykorzystuje krzywą RWS w przypadku określania odporności ogniowej tuneli. Niestety w Europejskich Dokumentach Oceny EAD 350402-00-1106, EAD 350142-00-1106 i EAD 350140-00-1106, dotyczących biernych i reaktywnych systemów zabezpieczeń ogniochronnych, nie przywołuje się innych procedur badawczych niż normy europejskie z serii PN-EN 13381. W praktyce oznacza to, że nie można w Europejskiej Ocenie Technicznej zawrzeć informacji o skuteczności ogniochronnej wyrobu na wypadek pożaru o temperaturze opisanej krzywą RWS. Konieczne jest uzyskanie Krajowej Oceny Technicznej w każdym z krajów z osobną lub bazowanie na tzw. dopuszczeniach jednostkowych, co z punktu widzenia producenta jest problematyczne. Różnice pomiędzy obydwiema metodami PN-EN 13381-3 vs 2008-Efectis-R0695 są na tyle duże, że nie da się w prosty sposób przełożyć wyników badań z normy europejskiej na metodę adekwatną do krzywej RWS. Badania wg metod europejskich wykonuje się bowiem na elementach obciążonych, gdzie ocenie podlega również deformacja elementu próbnego i jej wpływ na przyczepność izolacji ogniochronnej, a samą nośność ogniową elementu ocenia kryteriami maksymalnego ugięcia i maksymalnej szybkości narastania ugięcia. Natomiast w metodzie Efectis nie ma obciążenia, pomiaru deformacji również, co wydaje się niezgodne z rzeczywistością. Poza tym, ewentualne rozszerzenie wyników badań, poza dozwolonym zakresem zastosowania, w myśl tzw. expert judgment i w oparciu o Eurokody, może być kłopotliwe w odniesieniu do wyników badań uzyskanych z metody 2008-Efectis-R0695. Problematiczne jest tu zarówno opisanie warunków nagrzewania (np. określenie wartości współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję), jak i uwzględnienie ograniczeń Eurokodów, a przede wszystkim PN-EN 1992-1-2, w którym, w punkcie 3.1.1 zapisano *Liczby wartości właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych podane w tym rozdziale oparte zostały na badaniach stanu ustalonego, nieustalonego, a czasami na ich kombinacji. Ponieważ efekty pełzania nie są wprost uwzględnione, modele materiałowe w tym Eurokodzie mają zastosowanie dla prędkości nagrzewania o wartości od 2 K/min do 50 K/min. Dla prędkości nagrzewania niemieszczących się w powyższym zakresie wiarygodność właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych należy określić oddzielnie.* Co prawda krzywa standardowa w początkowej fazie przekracza przyrost temperatury 50 K/min, ale dopuszczono ją na innych zasadach. Krzywa RWS, która w początkowej fazie nagrzewania charakteryzuje się przyrostem temperatury nawet 290 K/min, znacznie przekracza wspomniane wcześniej kryterium.

Nowelizacja rozporządzenia [12] doprowadziła polskie przepisy do powszechnie uznanych warunków termicznych panujących w tunelach, co należy uznać za krok w dobrą stronę. Nie oznacza to jednak końca problemów wykonawców tuneli i producentów izolacji ogniochronnych, które wynikają z nienadążania norm badawczych za zmieniającymi się przepisami prawnymi. Podobny problem występuje z zamknięciami powszechnie stosowanymi w tunelach, gdyż zarówno wymagania, jak i normy badawcze bazują na krzywej standardowej, co nie odpowiada rzeczywistym warunkom panującym w tunelu podczas pożaru [8].

Literatura

- [1] Balasubramanian A. (2014). *Tunnels-types and importance. Technical report.* Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, March.
- [2] Beard A. 2011. *The handbook of tunnel fire safety.* ICE Publishing.
- [3] Breunese A. J., C. Both, G. M. Wolsink. 2008. *Fire testing procedure for concrete tunnel linings.* Efectis Nederland-R0695. No. 2007221-103. September.
- [4] Carvel R. O., G. Marlair. 2005. *A history of fire incidents in tunnels. In the handbook of Tunnel Fire Safety* (A. N. Beard and R. O. Carvel, Eds.), Thomas Telford Publishing, 3-41, London, UK.
- [5] Furtak Kazimierz, M. Kędracki. 2005. *Podstawy budowy tuneli.* Kraków. Wydawnictwo PK.
- [6] Gajecka-Graniczna I., Paweł Sulik. 2018. „Weryfikacja ogniochronnych powłok malarskich”. *Izolacje*, R XXIII (nr 225), 74 – 80.
- [7] Hejny H. 2007. *The European project UpTun: results of four years of research to improve the level of fire safety in existing tunnels.* Safety and Security Engineering II. WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 94. 191 – 204.
- [8] Izydorczyk Daniel, Bartłomiej Sędlak, Paweł Sulik. 2017. *Fire door in tunnels emergency exits – smoke control and fire resistance tests.* IFireSS: 2nd International Fire Safety Symposium. Napoli, Italy, June 7-9, 835-842.
- [9] Jansson R. 2013. *Fire Spalling of Concrete. Theoretical and Experimental Studies.* Doctoral thesis in concrete structures. KTH Architecture and the Built Environment. TRITA-BKN. Bulletin 117. Stockholm, Sweden.
- [10] Siemińska-Lewandowska Anna. 2008. „Klasyfikacja metod budowy tuneli wraz z przykładami”. *Materiały Budowlane* 426 (2): 26 – 31.
- [11] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. 2000 nr 63 poz. 735 z 3 sierpnia 2000 r. z późniejszymi zmianami).
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 1 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. 2019 poz. 1642 z 29 sierpnia 2019 r.).
- [13] Sejnoha M., M. Broucek. 2014. „Fire resistance of concrete with fly ash content – experimental analysis”. *Engineering Mechanics*, Vol. 21, No. 4, 159 – 165.
- [14] Sulik Paweł. 2018. „Bierne zabezpieczenia przeciwpożarowe konstrukcji”. *Izolacje* R XXIII (nr 224), 118 – 124.
- [15] Sulik Paweł, Piotr Turkowski, Wojciech Węgrzyński, Bartłomiej Sędlak, Paweł Roszkowski, Grzegorz Krajewski. 2018. *Bezpieczeństwo pożarowe podziemnej infrastruktury transportowej. Cz. 1: Pasywne systemy zabezpieczeń. Inżynieria kolejowa – szanse i wyzwania: 64.* Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, s. 291-316 Kraków: Politechnika Krakowska.
- [16] Węgrzyński Wojciech, Paweł Sulik, Grzegorz Krajewski, P. Antosiewicz. 2018. *Bezpieczeństwo pożarowe podziemnej infrastruktury kolejowej. Cz. 2: Aktywne systemy zabezpieczeń. Inżynieria kolejowa – szanse i wyzwania: 64.* Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, s. 317-330 Kraków. Politechnika Krakowska.

Przyjęto do druku: 28.01.2020 r.

Zapraszamy na stronę internetową

www.materiałybudowlane.info.pl/science